

## Лабораторная работа № 1.20, 22<sup>1)</sup>

### Изучение свойств жидкости

#### Введение

Стационарное течение идеальной жидкости по горизонтальной трубе описывается уравнением Бернулли:

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $p_1, v_1, p_2, v_2$  – давления и скорости жидкости в двух произвольных сечениях трубки  $S_1$  и  $S_2$ . Расход жидкости (то есть объем жидкости -  $V$ , протекающей через любое сечение трубки в единицу времени) рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{теор}} = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\left(\frac{1}{S_1^2} - \frac{1}{S_2^2}\right)\rho}}. \quad (2)$$

Экспериментальное значение  $Q_{\text{экс}}$  определяется из соотношения

$$Q_{\text{экс}} = V / t. \quad (2a)$$

В **Задании 1** изучается движение воды по горизонтальной трубе переменного сечения. В стационарном режиме при малых скоростях течения воды можно сделать допущение, что весь поток жидкости представляет единую трубку тока. Вода не является идеальной жидкостью, и поэтому экспериментально найденная зависимость расхода воды от перепада давлений ( $\Delta p = p_2 - p_1$ ) будет отличаться от теоретической, заданной уравнением (2). Относительная величина этого отклонения с учетом погрешностей эксперимента позволяет судить о возможности применения уравнения Бернулли к решению конкретных задач с заданным значением допустимых ошибок.

Движения шарика в вязкой среде изучается в **Задании 2**. Зависимость скорости такого движения от времени описывается выражением:

$$v = \frac{2g(\rho - \rho_{\text{ж}})r^2}{9\eta} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (3)$$

где  $\rho, \rho_{\text{ж}}$  – плотности шарика и жидкости,  $r$  – радиус шарика,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\eta$  – коэффициент вязкости жидкости,  $\tau = \frac{2}{9}\rho\frac{r^2}{\eta}$  – время установления движения.

При  $t \rightarrow \infty$  (а фактически, когда  $t > \tau$ ) движение становится равномерным. Эта формула справедлива при условиях, когда движение жидкости относительно шарика можно считать ламинарным и сила трения описывается формулой Стокса:

$$\vec{F} = -6\pi r \eta \vec{v}.$$

<sup>1)</sup> Подготовлено преподавателями КОЭФ Александровым В.Н., Васильевой И.А. и Коротаевой Е.А.

Движение можно считать ламинарным, если число Рейнольдса  $Re = \rho_{ж} v r / \eta < 10^3$  в методе Стокса коэффициент вязкости жидкости определяется из измерений размера шарика и значения установившейся скорости движения  $v_{уст}$  (см. задачу 4.80 в [5]):

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{g(\rho - \rho_{ж})r^2}{v_{уст}}. \quad (4)$$

### Экспериментальные задачи, поставленные в работе:

- изучение стационарного течения жидкости по трубе переменного сечения;
- определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса;
- определение абсолютной и относительной ошибок косвенных измерений.

### Описание экспериментальных установок

Трубка переменного сечения, используемая в **Задании 1**, изображена на рис. 20.1. Один конец трубки соединен резиновым шлангом с водопроводным краном. Протекающая через трубку вода с помощью другого шланга отводится в раковину или в мерный сосуд. В узком  $S_2$  и широком  $S_1$  сечениях горизонтальной трубки впаяны вертикальные трубки. Разность уровней воды в них при стационарном потоке воды показывает разность давлений воды на стенки горизонтальной трубки в данных сечениях. Верхние концы впаянных трубок соединены вместе резиновым шлангом, который опускается в раковину. Это предотвращает бесконтрольный выброс воды через трубки при слишком большой разности давлений  $\Delta p$ . Скорость течения воды регулируется краном. Расход воды определяется с помощью мерного сосуда.

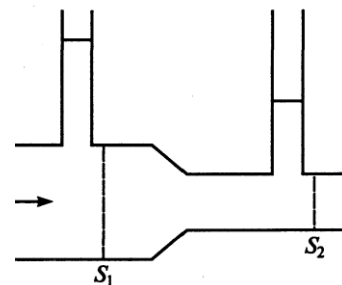


Рис. 20.1.

Экспериментальная установка позволяет производить измерение расхода воды для заданной разности давления  $\Delta p = p_2 - p_1$  между двумя фиксированными сечениями трубы. Расход воды определяется из измерений объема воды  $V$ , заполняющей мерный сосуд за время  $\Delta t$ .

Схема установки **Задания 2** показана на рис. 20.2. Вязкая жидкость (глицерин) налита в цилиндрический сосуд с нанесенными на внешней стороне краской рисками-кольцами, расстояние между которыми измеряют линейкой. Первая риска должна быть нанесена в том месте сосуда, где движение шарика уже устоявшееся и скорость движения не меняется. В качестве шарика используется свинцовая дробь. Время прохождения дробинкой этого расстояния отсчитывается по секундомеру. Радиус шарика измеряют с помощью микрометра. Чтобы при погружении дробинки в жидкость к ней не прилипали пузырьки воздуха, дробинку предварительно следует смочить глицерином.

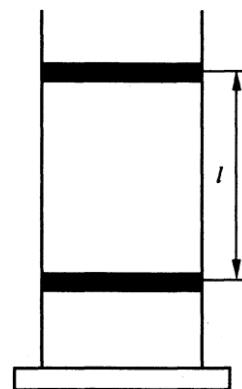


Рис. 20.2.

## Подготовка протокола к работе

*(Выполняется во внеаудиторное время при подготовке к занятию)*

Запишите в лабораторной тетради номер и название работы.

Запишите в тетради заголовок: «**Задание 1. Изучение стационарного течения жидкости по трубе переменного сечения**».

Запишите формулы, используемые при выполнении **Задания 1** с расшифровкой буквенных обозначений, и табл. 1 и 2 для записи результатов измерений и вычислений  $Q$  и  $\varepsilon_Q$ . Подготовьте лист миллиметровки для построения графика.

Табл. 1.

№ эксп.	$\Delta h$ , мм вод.ст.	$\Delta p = \rho g \Delta h$ , па	$\Delta t$ , с			$\Delta t_{\text{ср}}$ , с			$V$ , $\times 10^{-3}$ м <sup>3</sup>	$V_{\text{ср}}$ , $\times 10^{-3}$ м <sup>3</sup>

Табл. 2.

№ эксп.	$Q_{\text{эксп}}$ , $\times 10^{-3}$ м <sup>3</sup> с <sup>-1</sup>	$Q_{\text{теор}}$ , $\times 10^{-3}$ м <sup>3</sup> с <sup>-1</sup>	$\frac{Q_{\text{теор}} - Q_{\text{эксп}}}{Q_{\text{теор}}}$ , %	$\varepsilon_Q$ , %

Оставьте в тетради место (0,5 стр.) для вспомогательных записей и вычислений и запишите заголовок: «**Задание 2. Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса**».

Запишите формулы, используемые при выполнении **Задания 2** с расшифровкой буквенных обозначений, и табл. 3 для записи результатов измерений.

Табл. 3

$r$ , м	$t$ , с	$l$ , м	$\tau$ , с	$v_0$ , м/с	$\eta$ , Па с	$\Delta \eta$ , Па с	Re
$\rho =$ _____ кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{\text{ж}} =$ _____ кг/м <sup>3</sup>	$\eta_{\text{ср}} =$ _____ Па с	$\Delta \eta_{\text{max}} =$ _____ Па с				

## Измерения и обработка результатов

### Задание 1

Произведите измерения  $Q$  для пяти значений  $\Delta p$  через каждые 20 мм водяного столба (мм в.с.), начиная с  $\Delta p = 20$  мм водяного столба. Следует выполнить не менее трех серий таких измерений. По полученным данным постройте график зависимости  $Q_{\text{эксп}} = f(\sqrt{\Delta p})$  в координатах  $\{\sqrt{\Delta p}, Q\}$ . На тот же график нанесите теоретическую зависимость, полученную по формуле (2), не забыв при вычислениях перевести [мм в.с.] в [Па]. Оцените случайную ошибку измерений. Данные измерений  $V$ ,  $\Delta t$ ,  $\Delta p$ ,  $V_{\text{ср}}$ ,  $\Delta t_{\text{ср}}$  и вычислений  $Q_{\text{эксп}}$ ,  $Q_{\text{теор}}$  и относительной ошибки косвенных измерений (см. примеры в **В4** [4] и **Приложение** в настоящей работе) расхода жидкости  $\varepsilon_Q$  внесите в табл. 1 и табл. 2 для экспериментальных и расчетных данных, соответственно.

### Задание 2

Измерьте скорость движения шарика. Проведите 5 опытов, записав в табл. 2:  $t$ ,  $l$ ,  $v_0$ ,  $r$ . Рассчитайте значение  $\eta$  в каждом опыте. Определите среднее значение  $\eta$  и максимальное значение  $\Delta\eta$ . Значения  $\rho$  и  $\rho_{\text{ж}}$  возьмите из таблиц. Рассчитайте числа Рейнольдса для двух опытов. Рассчитайте время установления скорости равномерного движения  $\tau$  для двух опытов. Данные измерений и вычислений внесите в табл. 2.

Вычислите и запишите в тетради относительную ошибку косвенных измерений коэффициента вязкости жидкости (см. примеры в **В4** [4] и **Приложение** в настоящей работе).

## Приложение

### Задание 1

Расход жидкости  $Q_{\text{теор}}$  вычисляется по результатам прямых измерений по формуле (2а), то есть косвенным измерением. Тогда, используя примеры в **В4** [4], получим:

$$\varepsilon_{Q_{\text{экс}}}^2 = \varepsilon_V^2 + \varepsilon_t^2. \quad (5)$$

### Задание 2

Вязкость жидкости вычисляется по результатам прямых измерений по формуле (4), то есть косвенным измерением. Тогда, используя примеры в **В4** [4], получим:

$$\varepsilon_{\eta}^2 = \varepsilon_g^2 + \frac{\rho^2 \varepsilon_{\rho}^2 + \rho_{\text{ж}}^2 \varepsilon_{\rho_{\text{ж}}}^2}{(\rho - \rho_{\text{ж}})^2} + 4\varepsilon_r^2 + \varepsilon_l^2 + \varepsilon_t^2. \quad (6)$$

### Рекомендуемая литература:

1. Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Мансуров А.Н. Курс общей физики. Механика» (2001), §7.3-7.6, 10.2-10.6.

2. Стрелков С.П. Механика. (4-е изд., 2005), § 39-40, 100-111.

3. Сивухин Д.В. Общий курс физики в 5-ти томах, т. 1, Механика (4-е изд., 2005), §94,95.

4. Введение в физический практикум.

5. Механика. Задачи и решения. Казанцева А.Б., Каменецкая М.С., др. - М.: КолосС, 2005

### ***Примерные контрольные вопросы***

1. Объясните различие между теоретической и полученной вами экспериментальной зависимостью  $Q_{\text{эксп}} = f(\sqrt{\Delta p})$ .

2. Изменятся ли результаты эксперимента, если изменить направление течения?

3. Как измеряются статическое и динамическое давления?

4. Чем определяется случайная ошибка эксперимента? Как повысить точность измерений?

5. Выведите формулы (1) и (2).

6. Запишите уравнение движения шарика в вязкой жидкости. Найдите его решение.

7. Объясните физический смысл числа Рейнольдса.

8. Как изменится характер движения шарика, в условиях, когда  $10^3 < Re < 10^4$ ?

9. Запишите уравнение движения шарика, брошенного вверх с начальной скоростью  $v_0$ , если движение происходит в вязкой жидкости. Найдите его решение.

10. Почему отсчет времени движения шарика ведется не от поверхности жидкости, а от некоторой глубины (обозначенной первым кольцом)? Как оценить эту глубину?